

Kazimierz Twardowski*, Ryszard Drożdżak**

**UWARUNKOWANIA
DOTYCZĄCE LABORATORYJNYCH METOD OZNACZANIA
WODOPRZEPUSZCZALNOŚCI GRUNTÓW*****

1. WSTĘP

Określenie właściwości filtracyjnych gruntów ma coraz większe znaczenie praktyczne i jest niezwykle ważne przy wyznaczaniu parametrów migracji wód podziemnych w przepuszczalnych ośrodkach gruntowych.

Właściwości filtracyjne gruntów mają podstawowe znaczenie przy inżyniersko-geologicznej i hydrogeologicznej ocenie terenu [4, 5, 10]. W zagadnieniach inżyniersko-geologicznych określają one współpracę układu obiekt inżynierski – podłoże budowlane, a także wykorzystywane są w modelowaniu matematycznym i symulacjach procesów wodno-glebowych [3].

Podstawowym parametrem petrofizycznym gruntów wykorzystywanym do ilościowego opisu przepływu w nich wody jest wodoprzepuszczalność K (współczynnik filtracji, przewodność hydrauliczna, stała Darcy'ego).

W praktyce znanych i stosowanych jest wiele sposobów określania współczynnika filtracji gruntów, z których na szczególną uwagę zasługują metody laboratoryjne.

W dość długim okresie praktyki laboratoryjnego określania współczynnika filtracji opracowano najrozmaitsze metody i przyrządy pomiarowe, uzależnione zwykle od różnorodnych uwarunkowań, w szczególności od rodzaju materiału gruntowego, wymaganej dokładności pomiaru oraz od możliwości technicznych laboratorium.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Studia doktoranckie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

*** Praca wykonana w ramach badań własnych

2. PODZIAŁ METOD LABORATORYJNYCH OKREŚLANIA WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI

Biorąc pod uwagę przebieg badania oraz mierzone w czasie jego trwania wielkości, przyrządy do oznaczania współczynnika filtracji podzielić można na cztery zasadnicze grupy [4, 5]:

- grupa I – obejmuje przyrządy, w których pomiar odbywa się przy stałej różnicy ciśnienia wody przepływającej przez próbkę (stałogradientowe);
- grupa II – przyrządy, w których pomiar odbywa przy ciągłej zmianie ciśnienia wody przepływającej przez próbkę (zmiennogradientowe);
- grupa III – przyrządy wykorzystujące właściwości kapilarne gruntów oraz zjawiska fizykochemiczne zachodzące na kontakcie fazy stałej i ciekłej;
- grupa IV – obejmuje przyrządy, których działanie oparte jest na wykorzystaniu zasad dotyczących przyrządów grup poprzednich.

Niezależnie jednak od konstrukcji oraz złożoności technicznej, zasady teoretyczne ich działania są bardzo zbliżone. Należy także dodać, iż w przeprowadzeniu samego pomiaru niebagatelną rolę odgrywa samo przygotowanie próbek. Przygotowany do badań materiał powinien cechować się stanem fizycznym identycznym lub zbliżonym do naturalnego [7, 11, 12].

W pracy przedstawiono metody różniące się istotnie stopniem zaawansowania technicznego, począwszy od metod prostych, ale tanich i nieskomplikowanych, aż po metody dość złożone, niejednokrotnie skomputeryzowane.

Przy prezentacji poszczególnych metod przedstawiane są wykorzystywane w nich wzory w wersji wielkościowej z pominięciem występujących w nich współczynników i parametrów liczbowych. Stosowane są przy tym oznaczenia wielkości fizycznych zgodne z serią norm PN-ISO 31 z lat 2001–2002.

Dotyczą one w szczególności następujących oznaczeń:

- V – objętość przepływającej wody,
- l – długość próbki (droga filtracji)
- A – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki (powierzchnia filtracji),
- t – czas,
- ρ – gęstość wody,
- $\gamma = \rho \cdot g$ – ciężar właściwy wody (gdzie g oznacza przyspieszenie ziemskie),
- p – ciśnienie,
- H – wysokość hydrauliczna (napór hydrauliczny),
- $I = \text{grad } H$ – spadek hydrauliczny (gradient hydrauliczny),
- n – porowatość próbki.

3. METODY LABORATORYJNE OBEJMUJĄCE PRZYRZĄDY GRUPY I

3.1. Metoda stałogradientowa oznaczania współczynnika filtracji

W tej metodzie zadaje się stałe ciśnienie na dolną powierzchnię badanej próbki. Pomiar prowadzi się, mierząc wydatek przepływu wody przez próbkę gruntu o znanej powierzchni przekroju i długości [5, 6].

Współczynnik filtracji K otrzymujemy ze wzoru

$$K = \frac{V \cdot I}{A \cdot t \cdot \Delta H} \quad (1)$$

gdzie ΔH oznacza różnicę wysokości hydraulicznej.

W trakcie badania próbkę o określonych wymiarach umieszcza się w przyrządzie między płytkami perforowanymi. Aby usunąć powietrze z próbki, przyrząd i próbkę wypełnia się wodą od dołu. Istota badania polega na ustaleniu wartości różnicy naporu ΔH oraz objętości przepływającej przez próbkę wody V w określonym czasie t [5, 6]. Dodatkowo mierzona jest temperatura, aby sprowadzić obliczony współczynnik do temperatury $T = 10^\circ\text{C}$.

3.2. Pomiar współczynnika filtracji przyrządem ITB-ZW-K2

Przyrząd ITB-ZW-K2 służy do badania gruntów, których współczynnik filtracji K jest większy od 10^{-6} m/s [5]. Zalicza się do nich żwiry, pospółki oraz piaski (od gruboziarnistych do pylistych). Zasadnicze części przyrządu stanowią dwa cylindry metalowe (zewewnętrzny i wewnętrzny) umożliwiające powstanie różnych poziomów wody oraz pierścien pomiarowy, w którym umieszcza się próbkę gruntu [5, 11].

Badanie polega na określeniu ilości wody V , która przefiltruje przez próbkę gruntu o przekroju A w czasie t przy spadku hydraulicznym I i określonej temperaturze filtracji wody. Współczynnik filtracji K oblicza się ze wzoru [5, 11]

$$K = \frac{V}{A \cdot I \cdot t} \quad (2)$$

Badania przeprowadza się przede wszystkim dla celów budowlanych, wykorzystując próbki o nienaruszonej strukturze. Dla gruntów nasypowych (zapory ziemne, groble, podsypka pod powierzchnie drogowe) bada się próbki odpowiednio zagęszczone [11].

3.3. Pomiar współczynnika filtracji przy poziomym przepływie wody

Kolejnym ciekawym rozwiązaniem pomiaru współczynnika filtracji przy stałej różnicy ciśnień jest metoda poziomego przepływu wody. Metoda jest szczególnie przydatna, gdy oblicza się współczynnik filtracji zależny od kierunku uwarstwienia (dla gruntów anizotropowych). Matematyczny sposób oceny współczynnika filtracji jest taki sam jak w metodzie omówionej poprzednio, natomiast samo przygotowanie próbek jest odmienne [11]. Pobiera się je w taki sposób, aby kierunek przepływu wody w trakcie pomiaru był zgodny z uwarstwieniem gruntu.

W przypadku gruntu anizotropowego lub przy ukośnym przepływie wody należy laboratoryjnie określić współczynnik filtracji przy pionowym i poziomym kierunku przepływu wody. Do analizy filtracji przyjmuje się wówczas uśredniony współczynnik K_{sr} dla rozpatrywanego anizotropowego ośrodka gruntowego [11]

$$K_{sr} = (K_h \cdot K_v)^{0,5} \quad (3)$$

gdzie K_h i K_v oznaczają wartości współczynnika filtracji w kierunku poziomym i pionowym.

4. METODY LABORATORYJNE OBEJMUJĄCE PRZYRZĄDY GRUPY II

4.1. Przyrząd do wyznaczania współczynnika filtracji w gruntach spoistych przy zmiennej różnicy ciśnień

Według założeń teoretycznych we wszystkich metodach zmiennogradentowych gradient ciśnienia zmniejsza się wraz z upływem czasu, zbliżając się asymptotycznie do określonego poziomu. Oznacza to, że badania prowadzi się dla ciśnienia zmiennego przy zmianach naporu od H_1 do H_2 , w przedziale czasu od t_0 do t [5, 6].

Ogólnie można stwierdzić, że metody zmiennogradentowe przydatne są w odniesieniu do gruntów spoistych o małej przepuszczalności. Wiąże się to z tym, że w odniesieniu do metod stałogradentowych czas przepływu wody przez próbkę gruntu byłby zbyt długi, a parowanie zachodziłoby w niektórych przypadkach szybciej niż mierzony przepływ wody [11].

Pomiar opiera się na prawie Darcy'ego, gdy znając powierzchnię przekroju porzecznego rurki ciśnieniowej a , określa się współczynnik filtracji wg wzoru

$$K = \frac{a \cdot l}{t \cdot A} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (4)$$

gdzie H_1 i H_2 oznaczają wartości wysokości hydraulicznej w rurce manometrycznej w momentach czasowych 0 i t .

Przebieg badania jest podobny jak w metodzie stałogradentowej. W przypadku długiego pomiaru należy liczyć się z istotnym wpływem parowania wody z powierzchni próbki gruntu [5].

4.2. Rurka Kamińskiego

Mimo znacznej prostoty i pewnych ograniczeń, metoda ta znalazła powszechne zastosowanie w praktyce jako prosty sposób oznaczania współczynnika filtracji gruntów [5, 8].

Sposób oznaczania współczynnika filtracji opiera się na zasadzie pomiaru prędkości obniżania się zwierciadła wody swobodnie wypływającej z rurki zawierającej próbkę badanej skały/gruntu. Metoda pozwala na bardzo proste i szybkie oznaczanie przybliżonej wartości współczynnika filtracji gruntów dobrze przepuszczalnych, czyli głównie piasków i żwirów. Zasadą metody jest pomiar prędkości obniżania się zwierciadła wody przepływającej przez próbkę o wysokości l przy zmiennym (malejącym) ciśnieniu słupa wody.

Wzór do oceny współczynnika filtracji ma postać

$$K = -\frac{l}{t} \ln \left(1 - \frac{s}{H_0} \right) \quad (5)$$

gdzie:

- s – obniżenie wysokości słupa wody,
- t – czas obniżania się słupa wody na wysokości s ,
- H_0 – początkowa wysokość hydrauliczna w rurce.

Aby uprościć obliczanie współczynnika filtracji, Kamieński sporządził wykres pozwalający łatwo znaleźć wartość $\ln(1 - s/H_0)$. Można go znaleźć w podstawowej literaturze z zakresu hydrogeologii.

4.3. Pomiar współczynnika filtracji za pomocą edometru typu ITB-ZW

Jak już wspomniano wcześniej, metody stałogradientowe generalnie nie nadają się do określania współczynnika filtracji gruntów spoistych o małej przepuszczalności. Stosuje się wówczas metody zmiennogradientowe – najczęściej wyznacza się współczynnik filtracji w specjalnie przystosowanych do tego celu edometrach typu ITB-ZW [6, 11].

Zasada pomiaru polega na tym, że dopływ wody zachodzi przez rurkę o przekroju a wielokrotnie mniejszym od przekroju A próbki gruntu. Na początku badania w chwili t_1 poziom wody w rurce znajduje się na wysokości h_1 , w dowolnej chwili badania t poziom wody w rurce jest na wysokości h .

Wzór obliczeniowy do oceny współczynnika filtracji K ma postać

$$K = 2,3 \frac{a \cdot l}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (6)$$

gdzie h_2 oznacza poziom wody w rurce w chwili t_2 kończącej pomiar.

Przygotowanie próbek gruntu do pomiaru współczynnika filtracji w edometrze odbywa się podobnie jak przygotowanie próbek przy badaniu ścisłości. Pomiary należy wykonywać przy spadku hydraulicznym większym od tzw. początkowego spadku I_0 , którego wartości w gruntach spoistych wynoszą ponad 10, a w iłach dochodzą do 30 [2, 10].

4.4. Zmodyfikowany aparat Wita do oznaczania współczynnika filtracji

Metoda wykorzystująca zmodyfikowany aparat Wita [3] polega na pomiarze wydatku strumienia filtracji wody Q przez nasyconą próbkę gruntu oraz określeniu różnicy wysokości hydraulicznej ΔH między utrzymywanym przez pompę stałym poziomem wody w zbiorniku a jej zwierciadłem w umieszczonych w aparacie cylindrach pomiarowych.

Na tej podstawie, przy znanym przekroju cylindra F i grubości próbki Δl , oblicza się wartość współczynnika filtracji korzystając z wzoru [3, 13]

$$K = \frac{Q \Delta l}{F \Delta H} \quad (7)$$

gdzie:

- Q – ilość wody przepływającej przez próbkę w jednostce czasu,
- Δl – długość próbki mierzona w kierunku przepływu wody,
- F – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki, prostopadła do kierunku przepływu wody.

5. METODY LABORATORYJNE OBEJMUJĄCE PRZYRZĄDY GRUPY III

5.1. Przyrząd do wyznaczania współczynnika filtracji w gruntach spoistych wykorzystujący rurę poziomą zanurzoną w wodzie

Do wyznaczania współczynnika filtracji przy uwzględnieniu właściwości kapilarnych gruntów oraz zjawisk fizykochemicznych zachodzących na kontakcie fazy stałej i ciekłej wykorzystuje się często przyrząd, którego zasada pomiaru polega na wyznaczaniu prędkości kapilarnego zwilżania próbki gruntu umieszczonej w rurze szklanej i zanurzonej w poziomej pozycji w naczyniu napełnionym wodą [5].

Współczynnik filtracji określany jest jako funkcja prędkości kapilarnego nasycania suchej próbki po jej zanurzeniu w zbiorniku wody. Podczas pomiaru podciąganie kapilarne wnikałej wody jest stałe, natomiast prędkość ruchu wody maleje, w miarę wydłużania się zawilgoconej części próbki.

Końcowy wzór na obliczenie współczynnika filtracji ma postać

$$K = \frac{l^4 n}{t^2 B} \cdot \frac{v}{v_o} \quad (8)$$

gdzie:

- l – długość próbki zawilgoconej w czasie t [cm],
- n – porowatość próbki [%],
- B – współczynnik proporcjonalności przybierający dla pospolitych piasków wartości od $3,5 \cdot 10^4$ do $2 \cdot 10^5$, najczęściej przyjmowany $1 \cdot 10^5$,
- v, v_o – lepkość kinematyczna wody odpowiednio w temperaturze badania i temperaturze odniesienia (zwykle 10°C) [cm^2/s].

Metodę tą często używa się do oznaczania współczynnika filtracji w terenie.

5.2. Przyrząd Kaczyńskiego do oznaczania współczynnika filtracji w gruntach spoistych

Przyrząd opracowany przez R. Kaczyńskiego (1969) stosowany jest do badania współczynnika filtracji gruntów słaboprzepuszczalnych [4, 5]. Aparat jest także wykorzystywany obecnie po zmodyfikowaniu na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie.

Przyrząd i metoda opisane są dokładniej w pracy R. Drożdżaka publikowanej w niniejszym Półroczniku AGH Wiertnictwo Nafta Gaz.

Urządzenie składa się z poziomej rury o długości 40 cm i średnicy około 5 cm oraz zbiornika doprowadzającego wodę, w którym stałe ciśnienie utrzymywane jest za pomocą przelewu. Przed przystąpieniem do pomiaru próbkę skały należy wysuszyć w temperaturze 105°C i umieścić w rurze zagęszczając ją do stanu naturalnego.

Wzór końcowy do obliczania współczynnika filtracji K (w cm/s) ma postać

$$K = \frac{0,00834n (m_2 - m_1)}{(h_{o2} - h_{o1})} \quad (9)$$

gdzie:

- n – porowatość gruntu,
 h_{o2}, h_{o1} – napór hydrauliczny przy dwóch różnych położeniach zbiornika w momentach t_2 i t_1 ,
 m_2, m_1 – nachylenia prostych określonych przez iloraz $\frac{(x_2^2 - x_1^2)}{(t_2 - t_1)}$, gdzie x_2 i x_1 – długości strefy zawilgoconej kapilarnie próbki w momentach t_2 i t_1 .

Metoda opisana i zastosowana przez R. Kaczyńskiego znajduje zastosowanie w badaniach gruntów, szczególnie gruntów spoistych, gdzie duży wpływ na filtrację mają zjawiska kapilarne, a także chemizm wody przepływającej przez próbkę. Sam pomiar jest prosty, a pod względem ekonomicznym przyrząd oraz metoda są wyjątkowo atrakcyjne.

Na niekorzyść metody przemawia tylko długi czas trwania samego pomiaru, który dla gruntów o współczynniku filtracji rzędu 10^{-8} m/s wynosi nawet kilkadziesiąt godzin.

6. METODY LABORATORYJNE OBEJMUJĄCE PRYZRZĄDY GRUPY IV

Właściwości hydrauliczne gruntów nabierają szczególnej wagi w zagadnieniach inżynierskich związanych w szczególności z gruntami spoistymi nienasyconymi.

Jak wcześniej wspomniano, w gruntach tych nie można określić współczynnika filtracji opierając się tylko na liniowym prawie Darcy'ego, gdyż potrzebne są dodatkowe parametry określające przepływ wody w tego typu gruntach [2, 10].

W gruntach nienasyconych (tzn. trójfazowych) przepływ wody odbywa się według równań: Darcy'ego (zmodyfikowanego), Richardsa i Ficka, dlatego też w takich warunkach wyznacza się współczynnik filtracji w funkcji m.in. ciśnienia ssania i współczynnika dyfuzji. Grunty nienasycone, występujące w strefach aeracji i wzniosu kapilarnego, są często gruntami pęczniejącymi, w których filtracja wody w znacznym stopniu zależy od stanu naprężeń i odkształceń charakteryzujących grunt. W takich warunkach oceny współczynnika filtracji powinny dodatkowo odzwierciedlać stan obciążeń występujących w gruncie [2].

Złożoność teoretyczna badania współczynnika filtracji w gruntach spoistych zmusza do stosowania nowoczesnych metod zaawansowanych technologicznie, które pozwalają uwzględnić wspomniane powyżej zjawiska, mające niewątpliwie istotny wpływ na końcowy wynik pomiaru.

Poniżej opisano krótko trzy nowoczesne metody zaawansowane technologicznie oraz nawiązujące w swych założeniach konstrukcyjnych do przyrządów wcześniej omawianych.

6.1. Metoda stanu ustalonego i przyrząd Klutego do pomiaru współczynnika filtracji w gruntach nienasyconych

Metoda opisana przez A. Klutego w 1965 r. polega na wymuszeniu stałej wartości spadku hydraulicznego, wilgotności i ssania macierzystego w przekroju próbki gruntu nienasyconego.

Badana próbka o przekroju kołowym usytuowana jest pomiędzy ceramicznymi płytkami o dużych oporach na wejście powietrza, przy równoczesnym tensometrycznym po-

miarze ciśnienia wody w porach. Dostarczane powietrze utrzymuje ustalony przepływ, gdy prędkość dopływu wody do górnej powierzchni próbki równa się prędkości odpływu z dolnej powierzchni próbki. Podczas ustalonego przepływu dokonywany jest pomiar przepływu wody Q przez przekrój A , przy znanym spadku hydraulicznym w czasie t . Współczynnik filtracji K określa się dla kilku próbek o różnych wartościach ssania matrycowego (wilgotności).

6.2. Zmodyfikowany przyrząd trójosiowego ściskania według Żakowicza i Grabulewskiego

Do obecnie stosowanych metod stanu nieustalonego możemy zaliczyć zmodyfikowany przyrząd trójosiowego ściskania według S. Żakowicza i K. Grabulewskiego (1996) [2].

Pomiary w zmodyfikowanej komorze trójosiowego ściskania polegają na uwzględnieniu stanu naprężeń i odkształceń badanych próbek. Przewodność hydrauliczną gruntów obliczana jest z krzywej odpływu wody w funkcji potencjałów ssania gruntów w czasie jego nasycania lub wysuszania. Kolejnym atutem tej metody jest możliwość odtwarzania naturalnego stanu naprężeń występującego w podłożu gruntowym [2].

6.3. Oznaczanie współczynnika filtracji gruntów metodą FLOW-PUMP

Kolejną ciekawą metodą oznaczania współczynnika filtracji będącą kombinacją metod grup I–III jest metoda FLOW-PUMP [7] wykorzystywana m.in. na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH.

Podstawowymi elementami stanowiska badawczego są:

- komora hydrauliczna stałego ciśnienia,
- pompa infuzyjna z zestawem iniektorów,
- czujnik ciśnienia porowego,
- czujnik różnicowy.

Próbki przeznaczone do badań współczynnika filtracji umieszcza się w komorze hydraulicznej stałego ciśnienia, poddając je konsolidacji izotropowej oraz procesowi odpowietrzania i nasycania wodą. Następnie wymusza się przepływ wody ze stałym wydatkiem Q , kontrolując jednocześnie rozpraszanie się ciśnienia porowego w badanej próbce, identyfikowane jako różnica ΔH pomiędzy dolną a górną powierzchnią próbki.

Przepływ przez próbkę wymusza się za pomocą pompy infuzyjnej oraz iniektorów; pomiary prowadzi się do momentu ustabilizowania się wartości ciśnienia różnicowego ΔH . Pozorne współczynniki filtracji K_{poz} oraz współczynniki filtracji K odpowiadające ustabilizowanym wartościom różnicy ciśnień (naporów) ΔH oblicza się według następującego wzoru [9]

$$K = \frac{l \cdot Q}{A \cdot \Delta H} \quad (10)$$

Metoda poprzez zastosowane rozwiązania konstrukcyjne odzwierciedla wpływ konsolidacji filtracyjnej na przebieg badania próbki gruntu.

7. PODSUMOWANIE

Bezpośrednie metody laboratoryjnego wyznaczania współczynnika filtracji gruntów zasługują na szczególną uwagę ze względu na szybkość i powtarzalność wykonywanych badań, a także ze względów ekonomicznych w porównaniu z metodami polowymi, które są drogie i czasochłonne.

Metody laboratoryjne oparte są zasadniczo na liniowym prawie filtracji Darcy'ego z jego ewentualnymi modyfikacjami.

Istotnym, czasem zasadniczym problemem metod laboratoryjnych jest odpowiedni wybór próbek. Przygotowany materiał powinien zachowywać identyczne lub zbliżone do stanu naturalnego właściwości fizykochemiczne.

W okresie długoletniej praktyki laboratoryjnej określania współczynnika filtracji gruntów opracowano różnorakie przyrządy, służące do badania właściwości hydraulicznych gruntów. Ich konstrukcja głównie uzależniona jest od rodzaju materiału gruntowego poddanego badaniu. Niezależnie jednak od zróżnicowania konstrukcji zasady ich działania najczęściej są identyczne lub zbliżone.

LITERATURA

- [1] Batu V.: *Aquifer Hydraulics. A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*. Toronto, John Wiley & Sons, Inc New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/ 1998
- [2] Grabowska-Olszewska B.: *Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1998 (praca zbiorowa)
- [3] Iwanek M.: *Badanie współczynnika filtracji gleb metodą polową i w laboratorium*. Acta Agrophysica, nr 5(1), 2005
- [4] Kaczyński R.: *Oznaczanie współczynników filtracji gruntów słabo przepuszczalnych, półprzepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych*. Warszawa, Przegląd Geologiczny, nr 10, 1969
- [5] Kozerski B.: *Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych. Wytyczne określania współczynnika filtracji metodami pośrednimi i laboratoryjnymi*. Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne 1977
- [6] Malinowska E., Hyb M.: *Wyznaczanie współczynnika filtracji na podstawie badań laboratoryjnych*. Materiały konferencyjne. Geoinżynieria Środowiska. Transfer doświadczeń i dyrektyw Unii Europejskiej do nowo przyjętych państw. Warszawa, Seminarium EU GEO ENV NET 2004
- [7] Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J.: *Laboratoryjne i terenowe oznaczanie współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych*. Poznań, Wyd. Uniw. im. A. Mickiewicza 1998
- [8] Myślińska E.: *Laboratoryjne badania gruntów*. Warszawa, Wyd. Nauk. PWN 1998
- [9] Olsen H., Nichols R.W., Rice T.L.: *Low gradient permeability in a triaxial system*. Geotechnique, vol. 35, No. 2, 1985

- [10] Pisarczyk S.: *Gruntoznawstwo inżynierskie*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 2001
- [11] Pisarczyk S., Rymśza B.: *Badania laboratoryjne i polowe gruntów*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1993
- [12] PN-98/B-02481: *Geotechnika – Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar*. Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny 1998
- [13] PN-98/R-04033: *Gleby i utwory mineralne – Podział na frakcje i grupy granulometryczne*. Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny 1998
- [14] Zawadzki S., Olszta W.: *Zmodyfikowany aparat Wita do laboratoryjnego oznaczania przepuszczalności wodnej gleb*. Wiadomości IMUZ, t. XIV, z. 2, 1981